

数值天气预报的成功经验对洪水预报的启示

芮孝芳

(河海大学水文水资源学院,江苏 南京 210098)

摘要: 鉴于近 30 年来数值天气预报有了长足的进步,而在洪水预报中试图推行流域水文模型却进展缓慢这一现状,试图寻找洪水预报精度与数值天气预报精度的差距原因。通过对大气模式(型)和流域水文模型比较,围绕预报方法及预见期、初始场和边值场、数据同化和融合等问题,论述了数值天气预报的成功经验和流域水文模型在洪水预报应用中存在的问题,期望洪水预报能从中得到启示,在不远的将来实现流域水文模型与数值天气预报的无缝衔接,以进一步提高洪水预报精度,增长洪水预报预见期。

关键词: 流域水文模型;数值天气预报;初始场;边值场;数据同化;数据融合;大数据

中图分类号: P456.7;P338⁺.6 **文献标志码:** A **文章编号:** 1006-7647(2019)01-0001-06

Inspirations of successful experience of numerical weather prediction to flood forecasting//RUI Xiaofang(College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Since flood is formed by storm, flood forecasting is the continuity of precipitation prediction. In recent 30 years, numerical weather prediction has made great advance, but the attempt to apply watershed hydrological model in flood forecasting is slow. The reasons for the different accuracies between numerical weather prediction and flood forecasting are investigated. Successful experience of numerical weather prediction and the problems of watershed hydrological model in the application of flood forecasting are discussed by means of comparison of the weather model and the watershed hydrological model. Problems discussed are the prediction methods and the forecasting time, the initial fields and the boundary value fields, data assimilation and data fusion. It is expected that great inspirations to flood forecasting can be obtained from the successful experience of numerical weather prediction. In the near future, seamless connection can be realized between weather prediction and flood forecasting, and as a result, the accuracy of flood forecasting can thus be improved and the forecasting time can be extended.

Key words: watershed hydrological model; numerical weather prediction; initial field; boundary value field; data assimilation; data fusion; big data

20 世纪 90 年代,天气预报的准确率较低,一位基层水文站的工作人员每天根据广播电台播送的天气预报作预报:如果广播报明天是晴天,他就报明天是阴雨天;反之,如果广播报明天是阴雨天,他就报明天是晴天。1 年后发现广播发布的天气预报与他发布的天气预报准确率均在 50% 左右。这个故事虽带有幽默色彩,也可能比较片面,但基本上反映了当时降水预报的状况,当时降水预报的精度不及洪水预报精度。近 30 年过去了,人们发现降水预报的精度有了明显的提高,这主要得益于气象观测技术的提升和观测数据的进一步精细,以及数值天气预报理论和方法的日趋成熟。但洪水预报的进步却不甚明显,例如,已经盛行了近半个世纪的流域水文模

型对洪水预报的贡献就不如大气模式对数值天气预报的贡献。水文预报再也不能“坐井观天”了,应先从水文预报中“跳”出来,从天气预报的长足进步中吸取经验,审视不足,然后再作改进。

笔者尝试通过对预报的科学依据、预报方法和预见期、初始场和边值场、数据同化和数据融合等问题的论述,寻找洪水预报精度与数值天气预报精度的差距原因,试图为洪水预报的发展注入新动力。

1 预报的科学依据

天气变化是天气形势变化和气象要素变化的总称^[1]。天气形势是指高压、低压、槽脊、锋面、对流等天气系统的生成、移动、发展和消亡。气象要素是

指描述气温、湿度、风、云、降水、雾霾等天气现象的物理量。天气形势变化导致了气象要素变化。根据一定范围内现时或过往的天气形势对一地的未来天气形势及气象要素做出预先告知,或者根据与天气形势或气象要素有成因关系的先兆因子对未来的天气形势或气象要素做出预先告知,称为天气预报。天气形势预报是气象要素预报的基础,降水预报是天气预报中最重要的预报之一。

水文变化虽然也可区分为水文情势变化和水文要素变化^[2],但由于水文要素一般只是定量描述水文情势的物理量,不像天气形势与气象要素那样具有物理意义上的因果关系。因此,水文情势变化、水文要素变化和水文变化一般是同义的。例如:水情就是指水位、流量等的变化,沙情就是指含沙量、输沙率等的变化,墒情就是指土壤含水率的变化,冰情就是指冰厚、流凌等的变化,水质(水质状况)就是指污染物浓度、水质等级等的变化。气象要素的变化,以及下垫面和人类活动的作用是导致这些变化的原因。根据现时或前期出现的水文要素、气象条件、下垫面状况和人类活动,对其未来做出预先告知,或者根据与水文要素有成因关系的先兆因子,对其作出预先告知,称为水文预报。洪水预报无疑是水文预报中最重要的预报之一。

预报必须遵循预报对象所服从的科学规律,这些科学规律可以是普适性的物理定律,也可以是该领域的本构关系。

天气预报依据的科学规律主要是大气运动规律和大气热量及携带物质的输移、扩散、转化规律。大气是连续介质,因此利用连续性方程、动力方程、热力学方程、气体状态方程、水汽方程、扩散方程等的耦合就能描写天气系统的气压变化、温度变化、凝结和蒸发、降水形成、PM_{2.5}浓度变化等。

水文预报依据的科学规律比较多元^[2]。河流、湖泊、水库中发生的水流属于连续介质运动,可用 St. Venant 方程组来描写其运动规律。饱和土壤和非饱和土壤中的水流,属于多孔介质中运动的水流,应用渗流力学的连续性方程和饱和或非饱和 Darcy 定律来描写其运动规律。坡面上形成的净雨滴向河道的汇集似乎既不属于连续介质水流,也不属于多孔介质水流,就单个净雨滴而言,其运动受牛顿力学定律的支配,但无穷多个净雨滴从坡面各处向河道汇集的“集体表现”就不服从牛顿力学定律了,这时或许应借助于统计力学理论和方法来处理。如果净雨滴在汇集过程中还有相互作用,那么问题的复杂性必将增加。

2 预报方法及预见期

一个有意义、有价值的预报必须满足一定的预报精度,且具有一定的预见期。一个方法若没有预见期就不能称为预报方法;一个方法若预报精度不能满足一定要求,即使预见期较长也毫无价值,采信了这样的预报就可能造成重大损失。

天气预报已有很长的发展历史。大气科学家将曾经使用过的天气预报方法大体归纳成三类:一是天气图预报法,二是数值天气预报法,三是统计预报法。天气图预报法是最早出现也是最基础的天气预报方法。该方法以根据气象观测资料绘制的天气图为基本预报工具,通过分析不同时刻大气各层天气图所显示的天气系统,判断其生成、移动、发展、消亡以及相互之间的关系,然后做出天气形势和气象要素预报。数值天气预报法是从 1904 年发展起来的物理基础更坚实的天气预报方法。该方法以流体力学和动力气象学为理论基础^[3],通过建立由连续性方程、运动方程、气体状态方程、热力学方程、水汽方程、扩散方程等与初始条件和边界条件构成的数学物理方程来定解问题,再利用数值法进行求解。数值天气预报法得到的是空间网格节点上的气象要素的时间变化。统计预报法是以历史气象资料为基础,建立预报要素与先兆影响因子之间的因果关系从而作天气预报的方法。这种因果关系有函数关系和相关关系之分,在天气预报中,由于影响预报要素的先兆因子几乎无法完全掌握,因此所建立的都是统计相关关系,统计预报方法因此而得名。

水文预报的出现比天气预报晚。现阶段水文预报方法^[4]主要有河段洪水预报方法、流域洪水预报方法、水库洪水预报方法、枯水预报方法、墒情预报方法、冰情预报方法等,这些预报方法都是针对水文要素的方法。还有一类水文预报针对水文特征值,例如年径流量预报、年最大流量预报、年最枯流量预报等。河段洪水预报依据河道洪水波运动规律,常用方法有相应水位(流量)法、流量演算法、St. Venant 方程组解法等。流域洪水预报依据流域降雨径流形成原理,常用方法有降雨径流相关图-单位线法、降雨径流相关图-峰量关系法、流域水文模型法等。水库洪水预报依据水库洪水波运动规律,常用方法有调洪演算法、St. Venant 方程组解法等。枯水预报依据流域蓄水量的消退规律,常用方法有退水曲线法、相邻时段径流量相关法等。墒情预报依据土壤含量的增消机理,常用方法有水量平衡法、流域水文模型法等。冰情预报依据水体热量收支关系,常用方法有热量平衡法、水温模型法等。对于水

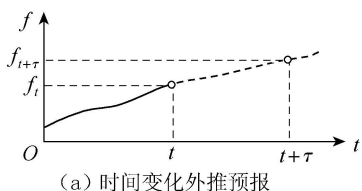
文特征值的预报,在当前的科学水平下一般有两种考虑:一是将水文特征值的年际变化视作平稳时刻序列,主要采用自相关来构建预报方法;二是分析影响水文特征值的先兆因子,通过建立多因子相关回归关系构建预报方法。

水文预报方法与天气预报方法似乎有所不同,但仔细剖析后可以发现,两者在解决各自的预报问题时所采用的科学思维是相同的,都是将预报问题视作动态变化外推问题,即视作初、边值问题或前后状态关系问题(图1,图中 f_i 为预报对象的初始值; $f_{i+\tau}$ 为预报对象的预报值),或者视作变量之间因果关系问题,即视作变量之间函数关系问题或相关关系问题(图2,图中 i_i 为先兆影响因子)。有些天气过程和水文过程属于动力学过程,可以表达成空间和时间的函数,一旦得到了这个函数,就可以据此做出预报。获得这个函数的方法不同,就产生了不同的预报方法。若该函数由观测得到,则可用经验外推建立预报方法,天气图法、相应水位(流量)法等就属于这类方法。若这个函数由描写现象动态变化规律的数学物理方程定解问题求得,则可以根据初值和边值外推建立预报方法,数值天气预报法、St. Venant 方程组解法、调洪演算法、流域水文模型法等就属于这类方法。有些天气过程和水文过程虽无法明确为动力学过程,但可以找出它们与有关先兆

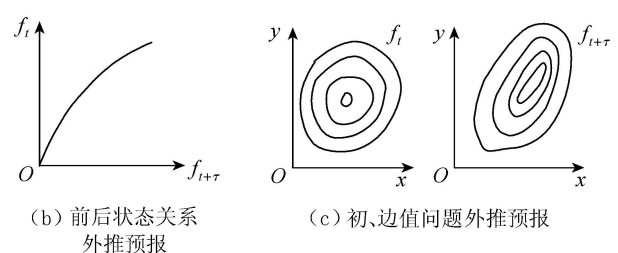
因子之间的因果关系,一旦建立了这种因果关系,就可以用作预报。所掌握的先兆因子是否全面,不仅决定了因果关系的性质,而且体现了预报方法的区别。若能够掌握所有的先兆影响因子,则得到的因果关系为函数关系;若只能掌握其中一些主要的先兆影响因子,则得到的因果关系为相关关系。在现行属于因果关系的预报方法中,真正属于函数关系的预报方法几乎没有。天气预报中的统计预报法和水文预报中的回归相关预报法,都是建立在变量间存在相关性因果关系基础上的预报方法,例如平稳时间序列自回归相关法、多因子回归相关法、峰量关系法等。

张学文^[5]主张用信息科学的思维来诠释预报方法,这是一种有益的尝试。根据张学文^[5]的理解,可以将初、边值以及先兆的影响因子等视作预报的信息源,这些信息源经过预报方法的变换、传递就变成所需预报的信息。也就是说,若立足于信息科学看预报,则预报就是一个信息变换和传递的问题。因此,无论天气预报还是水文预报都必须十分重视信息源的完整、详细、精确、可靠,以及信息处理理论和方法的正确。这就使人们明白了一个重要的道理:能够获得比信息源精度高的预报方法是不可能出现的,因为信息在变换、传递过程中只可能耗散,不可能增生。在流域水文模型的研究和应用中,笔者常常发现:实际上能提供的资料即信息源不仅有不同程度的缺失,而且不够精细,甚至质量不高,但却能得到令人满意的模拟结果。这种有违信息科学原理的结论应当引起水文学家的关注。

关于预见期,由于可作为初、边值问题的预报针对的是一个从形成到发展再到消亡的自然现象,前一个过程结束了,后一个过程跟随而来,因此,根据其中一个过程形成之初的状态预报其未来状态,最长的预见期只可能是该现象从形成到发展再到消亡经历的时间。如果再长,那么将要出现的状态就与前一个过程的初、边值无物理意义上的联系了。例如,若一个降水天气系统从形成到发展再到消亡为一周时间,则根据这个降水系统形成时的初、边值预测其未来,预见期最长就是一周^[1]。又如,若在一场具有一定时空分布的降雨落地后再作流域洪水预报,则这场降雨在当时流域下垫面条件作用下形成的洪水历经了流域汇流时间后才能到达流域出口。因此,流域洪水预报的预见期最长也只能是流域汇流时间^[2,6]。而对于作为因果关系的预报问题,预见期显然与先兆因子出现时间有关。但先兆影响因子出现时间提前越长,这种相关关系将会越弱。因此,为使预报精度能满足一定要求,所选择的先兆因



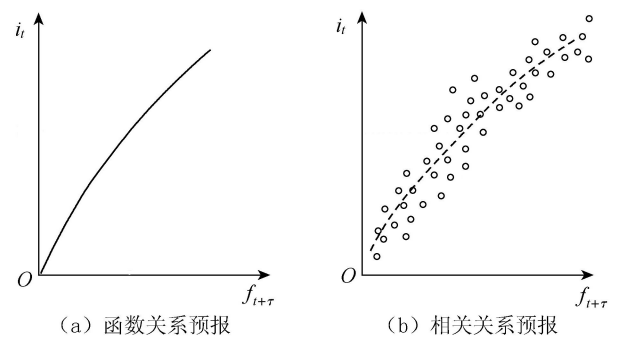
(a) 时间变化外推预报



(b) 前后状态关系外推预报

(c) 初、边值问题外推预报

图1 动态变化外推预报问题



(a) 函数关系预报

(b) 相关关系预报

图2 因果关系预报问题

子的提前时间必然会受到限制,这个时间就应该是作为因果关系预报问题的可能的最长预见期。

3 初始场和边值场

预报总是要从某一时间开始,对于可作为初、边值问题的预报,这个开始时间的状态就是待预报现象的初值,从初值开始,该现象将按一定规律变化,据此就可对其未来出现的状态做出预报,这就是初值问题。自然现象总是发生在一定空间范围内的,在这个空间里现象将如何变化,与这个空间的边界状态有关,这就产生了边值问题。因此,初值和边值的精确确定就成为作为初、边值问题预报的重要问题^[7]。

天气形势和气象要素变化总是发生在一定空间范围内且随时间变化,观察它的变化必须从某一时刻开始,在这个时刻,因天气形势和气象要素总是呈现一定的空间分布,故初值必表现为一定的空间分布,称为初始场,这个初始场的空间范围应当有边界,边界上的状态(边值)改变即扰动,也会影响这个空间范围内天气形势和气象要素的变化。水文情势和水文要素变化总是发生在各自水体中且随时间变化,观察它的变化同样要从某一时刻开始。对于河段洪水预报,这个时刻的水位和流量均沿河长变化,因此,初值表现为初始河段水面线或初始流量沿河长分布,而边值则是河段上、下断面的水位或流量随时间变化,以及从两岸进入或排出的流量过程。对于流域洪水预报,这个时刻的下垫面状态,包括流域包气带含水量、土壤结构、植物覆盖、地形地貌、水文地质、土地利用等,都是呈空间分布的,因此,初值也表现为空间分布,即为初始场。对于闭合流域,周边与外界无水量交换;流域表面通过降水和蒸散发与大气发生交换。包气带底部若为不透水基岩,则包气带与基岩不发生水量交换;若为地下水面,则包气带产生的地下水径流将进入地下含水层,这就是流域洪水预报方法的边值场。总之,对于作为初、边值问题的预报方法,初值呈空间分布,边值是时间的函数。

气象学家 Lorenz^[8]早在 1963 年就发现初始场对天气预报精度的重要影响,他指出:在天气预报中,初始场的微小变动将可能引起预报结果的极大差异,这就好像“巴西一只蝴蝶扇了一下翅膀,在美

国纽约将引起风暴”。科学界将此称为“蝴蝶效应”。水文预报是否存在“蝴蝶效应”,至今未见报道,笔者认为,这是一个需要深入研究的问题,但在使用流域水文模型作洪水预报时,初始场问题将会导致异参同效问题^[9-10],因为它的存在将使人们对所率定出的模型参数的正确性难以作出判断。

值得庆幸的是,数值天气预报虽然存在“蝴蝶效应”,但也许不会存在异参同效问题,因为大气是连续介质,地球大气圈的空气性质几乎是均一的,控制大气运动的流体力学和动力气象学都是比较成熟的学科,由此建立的用作数值天气预报的大气模式(型),例如正压原始方程模式、斜压原始程模式等,既不是概念性模型,更不是“黑箱子”模型,而是物理意义清晰的模型,这些模式(型)中所包含的参数几乎全球相同,不必通过实测气象资料来率定。

为了深入理解上述所作分析,将大气模式(型)和流域水文模型作一比较,如表 1 所示。

4 数据同化和数据融合

无论是天气预报,还是水文预报,对于那些作为初、边值问题的预报方法,一般都必须划分时间步长,一个步长接着一个步长进行计算,滚动地给出预报值,直至一个过程的结束。因此,在进行第一个时间步长计算时初值或初始场必须由观测资料给出,第二个时间步长之后的初值或初始场虽然可根据前一个时间步长的计算结果即预报值来代替,但为使所给初值或初始场能符合实际,保证预报值精度,一般应根据实时观测资料进行修正。由此不难理解观测资料对提高预报精度的重要性。

气象学家认为客观存在的大气状态总是表现为气象要素的空间分布是“和谐”的^[11]。例如实际出现的气压场不会发生某一位置的气压值与邻近气压值悬殊的情况。因此,气象要素观测值空间分布“和谐”应是一个规律,任何背离正常的高频或低频气象要素的存在都是与“和谐”不相符的。但由于观测仪器、观测方法等的不同,不同来源的气象观测资料具有不同的精度,这就可能产生一个事实上不“和谐”的问题。因此,气象学家指出,在涉及初值或初始场的天气预报方法中,给出的初值或初始场必须是“和谐”的。

表 1 大气模式(型)与流域水文模型主要特征的比较

模型	涉及的物理过程	介质特性	包含的参数	异参同效	初始场和边值场
大气模式(型)	大气动力学、大气热力学、蒸发与凝结等过程	连续介质,基本均匀	较少,几乎都是物理参数,一般不需利用实测资料来率定	未发现	初始场的精度很重要,发现了“蝴蝶效应”
流域水文模型	截留、蒸散发、下渗、土壤水、坡面流、河湖水流、地下水流等过程	多种介质组成,十分不均匀	较多,其中经验性参数占比很大,几乎都需要利用实测资料来率定	明显存在,且需率定的参数越多,存在越明显	尚未发现“蝴蝶效应”,但初始场和边值场的不准确也是引起异参同效的重要原因

在水文预报中,笔者认为,不仅初值或初始场要“和谐”,边值或边值场也要“和谐”。例如:对于流域水文模型预报方法,流域包气带含水量的初始场与预报精度密切有关是不言而喻的,而作为边值场的降雨空间分布与预报精度的关系更是十分紧密。但实际情况往往是,由不同仪器和方法观测得到的流域包气带含水量的初始场并不“和谐”,得到的降雨空间分布也不“和谐”。这些不和谐问题,若得不到正确处理,流域水文模型预报方法即使模型结构和参数合理,也不可能获得合理、可信的预报结果^[12]。

为了处理上述不和谐问题,气象学家率先在数值天气预报中提出了数据同化的重要概念和方法^[13]。天气预报和水文预报中的数据同化是指将对同一现象由不同来源、不同方法、不同时空分辨率观测得到的不同精度的数据引入用作数值天气预报的大气模式(型)或用作水文预报的流域水文模型,通过数学理论和方法,在模式或模型解与实际观测结果之间寻找最优拟合,这样的拟合结果可继续为数值天气预报或流域水文预报提供初始场,一个时间步长、一个时间步长地不断迭代下去,达到模式或模型的结果不断向观测值接近的目的。因此,在天气预报和水文预报中,数据同化实际上是一个最优控制问题,它是通过一定的算法来实现的。数据同化算法可分为顺序数据同化算法和连续数据同化算法两类。前者又称为滤波算法,包括预测和更新两个处理过程;后者需要定义一个同化窗口,利用这个窗口内的所有观测数据与模式或模型的状态值进行优化估计,通过迭代不断调整模式或模型的初始场或边界场,使模式或模型的结果能够拟合观测资料。

笔者认为,由于数据同化是通过一定的数学方法来实现利用不同来源、不同方法、不同时空分辨率、不同精度的数据,达到模式或模型的结果尽可能拟合观测资料的目的。因此,欲使数据同化有好的效果,模式或模型必须尽可能没有误差。这对数值天气预报的大气模式是提高精度的举措,但对于水文预报的流域水文模型却难以实现,因为流域水文模型本身就有结构误差,又有异参同效问题的干扰^[14]。在利用流域水文模型作洪水预报时仅致力于通过实时校正使模型结果与实测值“和谐”,而未涉及初始场和边值场的数据同化问题,显得不够缜密。气象学家将数据同化的重点放在初始场的确定上是值得借鉴的。对流域水文模型预报,不仅要对其初始场,而且要对边值场进行数据同化。

上述数据同化仅以模式或模型结果与观测值达到接近为目的,还不能判定同化后的观测资料一定

就是现象时空分布的真实描写。为此,应当引进“数据融合”的概念。数据融合是由图像融合的概念发展而来。用特定的算法将两幅或多幅图像综合成一幅新图像称为图像融合。将这一概念引入数据处理就成为数据融合。对来自不同种类信息源的数据,通过特定的手段、方法和工具集进行处理,以提高质量的技术,称为数据融合。这体现了从浩瀚的数据源中去伪存真、去粗取精,找出精准观测结果的思想。

最初,气象观测资料主要靠气象台站定点观测和放飞气球进行高空动点观测,这些观测方式得到的观测值的时空分布十分稀疏,而且占地球表面2/3的海洋上空几乎无法进行观测。随着航海、航空科技的进步,出现了利用飞机和舰船流动地进行高空和海洋气象观测的技术。利用雷达、卫星遥感、无人飞机遥感等技术获得气象观测资料也越来越普遍。这样就出现了同一时刻、不同位置的同一气象要素的观测值具有多种来源的情况,虽然它们的观测原理和方法不同,观测精度也不一致,但若将它们融合起来,也许能给出较为客观、准确的初始场。水文观测资料也有数据融合问题,尤其是降雨观测资料和流域包气带含水量观测资料都可能是多来源的,若能通过数据融合,获得更可靠的降雨空间分布和流域包气带含水量空间分布,则对提高洪水预报精度显然有重要意义。

数据融合有数据层融合、决策层融合和特征层融合之分。数据层融合就是直接对采集到的原始数据进行融合。在用不同方法对同一要素观测获得多源数据后,先对其中之一完成预处理、特征提取、识别或判断等,建立对观测要素的初步结论,再通过关联处理获得联合推断结果,称为决策层融合。特征层融合则是属于数据层融合和决策层融合之间的中间层次的融合,这类数据融合是先对多源数据进行特征提取,然后再对这些特征进行综合分析和处理。这里所指的特征是一些表征所观测要素的边缘、方向、速度等的指标值。与数据同化一样,现阶段所谓数据融合也是通过一定的算法来实现的。

数据同化偏向作为数学问题来处理,而数据融合则偏向作为物理问题来处理。但它们目前实际采用的算法几乎相同。笔者认为,数据同化和数据融合是一个问题的两种不同的解决思路,两者的目的都是期望尽可能克服由于信息缺失、信息量不足和信息质量参差不齐给预报带来的不利影响。为达此目的,数据同化采用的思路是通过多源资料的分析整合,使得用这样的初始场和边值场能获得尽可能与实测值相同的模拟结果,而数据融合采取的思路

路是通过对多源资料的去伪存真,弃粗取精,使输入模式或模型的初始场和边值场尽可能是真实的、精确的。

5 结 语

降水预报是天气预报中最重要的预报之一,洪水预报无疑是水文预报中最为重要的预报。暴雨是导致洪水的根本性原因,洪水预报必然是降水预报的延续。唯有将洪水预报与降水预报衔接起来,才能有效地增长洪水预报的预见期。在降水预报方法中,数值天气预报方法近 30 年来有了长足的进步,而用流域水文模型作洪水预报,其不尽人意之处比用数值天气预报方法作降水预报明显得多:

其一,对作为数值天气预报方法理论基础的大气模式(型)的构建,气象学家重视其物理性和精确性,而流域水文模型的研制却存在依据的物理机制比较粗糙的问题,目前较为流行的流域水文模型几乎都是概念性的。这种概念性和“黑箱子”流域水文模型也许能满足规划设计要求,但作为洪水预报方法就有明显的不足。

其二,气象学家认识到,用天气模式(型)作数值天气预报,必须十分重视初始场的精度,只有这样才能有效地避免“蝴蝶效应”的干扰。水文学家对用流域水文模型作洪水预报也依赖初始场的认识不够;对边界场影响洪水预报精度虽有一定认识,但改进的措施不力。

其三,大气模式(型)中包含的参数几乎都可以用物理方法确定,确定模式参数是求解正问题,一般不会出现异参同效问题,而流域水文模型中包含的参数大多必须依赖实测降雨、径流资料率定,确定参数是求解反问题,异参同效现象明显,是一个棘手问题。

其四,气象观测技术的提升迅速,信息源丰富,这就为数值天气预报采用数据同化、数据融合、大数据等技术,以提高初始场的精度,进而提高预报精度提供了有利条件。相比之下,水文观测技术明显落后,信息源也偏少,有一些必需的信息至今仍是空白,从而限制了以上技术在提高洪水预报精度中的作用。

“他山之石,可以攻玉”。笔者认为,数值天气预报的成功经验是值得洪水预报学习、借鉴的。

参考文献:

[1] 周恩济,林镜榆. 气象学[M]. 南京:河海大学出版社, 1989.

[2] 芮孝芳. 水文学原理[M]. 北京:高等教育出版社, 2013.

[3] 叶笃正,李崇银,王必魁. 动力气象学[M]. 北京:科学出版社,1988.

[4] 长江流域规划办公室. 水文预报方法[M]. 北京:水利电力出版社,1979.

[5] 张学文. 气象预告问题的信息分析[M]. 北京:科学出版社,1981.

[6] 芮孝芳. 产汇流理论[M]. 北京:水利电力出版社, 1995.

[7] 丑纪范. 数值天气预报的创新之路:从初值问题到反问题[J]. 气象学报,2007,65(5):673-682. (CHOU Jifan. An innovative road to numerical weather prediction; from initial value problem to inverse problem [J]. Acta Meteorologica Sinica, 2007, 65 (5): 673-682. (in Chinese))

[8] LORENZ E N. Deterministic nonperiodic flow[J]. J Atmos Sci,1963,20:130-141.

[9] 芮孝芳. 论流域水文模型[J]. 水利水电技术进展, 2017,37(4):1-7. (RUI Xiaofang. Discussion of watershed hydrological model [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2017, 37 (4): 1-7. (in Chinese))

[10] 芮孝芳. 对流域水文模型的再认识[J]. 水利水电科技进展,2018,38(2):1-7. (RUI Xiaofang. More discussion of watershed hydrological model[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2018, 38 (2): 1-7. (in Chinese))

[11] 沈桐立. 数值天气预报[M]. 2 版. 北京:气象出版社, 2015.

[12] 芮孝芳. 数据密集范式与水文学的未来[J]. 水利水电科技进展,2018,38(6):1-7. (RUI Xiaofang. Hydrology future prompted by paradigm of data-intensive [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2018,38(6):1-7. (in Chinese))

[13] 王跃山. 数据同化:它的缘起、含义和主要方法[J]. 海洋预报,1999,16(1):11-21. (WANG Yueshan. Data assimilation: its cause, its meaning and main procedures [J]. Marine Forecasts, 1999, 16 (1): 11-21. (in Chinese))

[14] 黄孝芳,朱庆平. 分布式流域水文模型研究中的几个问题[J]. 水利水电科技进展,2002,22(3):56-58. (RUI Xiaofang, ZHU Qingping. Some Problems in Research of Distributed Watershed Hydrological Model [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2002, 22 (3): 56-58. (in Chinese))

(收稿日期:2018-06-12 编辑:骆超)